

# 春季南海北部上混合层的数值模拟 与数值实验\*

刘秦玉 孙即霖 贾旭晶

(青岛海洋大学 物理海洋教育部重点实验室 海洋-大气相互作用与气候实验室 青岛 266003)

**提要** 根据 1998 年南海季风实验(SCSMEX)北部“实验 3 号”调查船的观测资料,采用一维湍动能模式(TKE 模式),对春季南海北部的 SST 及混合层随时间变化特征进行了数值模拟和数值试验。结果表明,TKE 模式能够很好地模拟南海北部的海表面温度 SST 和上混合层深度随时间变化基本特征。在南海 5—6 月, SST 的日振荡主要依赖于短波辐射的日变化,短波辐射是 SST 的主要维持机制;短波辐射会使 SST 升高 1—4℃;风的垂直混合作用主要是抑制了 SST 的日周期振荡。春季南海海面潜热通量和感热通量与短波辐射和风应力相比较,是一个对 SST 影响较小的量。南海北部 5 月份混合层深度的变化趋势和振荡特征受风应力和短波辐射共同控制,风应力使混合层深度加深 5—10m,短波辐射使混合层深度平均变浅 5—10m。而 6 月份南海北部,在夏季风爆发后短波辐射较小,短波辐射的作用只能使混合层深度变浅 1—2m,潜热通量和感热通量对混合层的作用会使混合层的深度加深 1—2m,混合层深度主要受风应力控制。

**关键词** 南海北部,混合层,湍动能模式,数值模拟

**中图分类号** P731

有关南海上混合层已有一系列的有关研究。徐锡祯等(1993)利用 1977 年 10 月和 1978 年 6—7 月两次南海中部海域调查资料,对该海区的温度、盐度、密度分布作了分析。发现该海区在 6—7 月存在盐度双跃层和逆跃层现象。根据 1907—1990 年南海大面调查资料,邱章等(1996)分析了 1994 年 9 月南沙群岛海区综合考察的 CTD 标准层资料,发现调查海区(108°—115°E), (4°—11°N)温跃层最大深度分布在中部偏西海域,部分测站存在多跃层现象。

纵观前人的工作,虽然对南海混合层有了一些研究,但仅限于对季节平均资料和断面调查资料上,这是由于在南海缺少超过 15 天以上的定点船舶观测资料。1998 年南海季风试验的 IOP 观测给作者提供了长达两个月的大气、海洋同步观测资料,并利用该资料分析了南海不同地点(南部和北部)上混合层与大气强迫的关系及海洋上层温、盐、密的垂直

\* 国家重点基础研究发展规划项目(中国近海环流形成变异机理、数值预测方法及对环境影响的研究), G1999043807 号;科技部攀登 A“南海季风试验研究”资助项目。刘秦玉,女,出生于 1946 年 3 月,教授,博士生导师, E-mail: liuqy@lib.ouqd.edu.cn

收稿日期: 2001-03-20, 收修改稿日期: 2002-04-25

分布特征,发现在西南季风爆发前后,南海北部、南部的两个观测点的海洋上混合层温度和深度随时间的变化具有不同的特点(刘秦玉等,2000):北部混合层温度经历由高到低再变高,混合层深度经历由浅变深再变浅的3个时段;南部混合层温度经历由低到高再变低,混合层深度经历由深变浅再变深的3个时段。这与南海南、北部海面的风和热通量具备不同的特征有关。5—6月南海上混合层动力、热力特征基本受局地风与短波辐射控制,潜热和感热的作用较小。5月份,南海南部观测点海面附近存在浅薄的高盐高密度层,60m以上的上层海洋内存在着许多高盐高密度核。在1998年南海季风实验期间南海南、北部两个观测点都存在较浅薄的障碍层,在西南季风爆发期间,南海北部观测点的障碍层较厚达到20m以上。以上研究定性地说明在夏季风爆发前后海洋上混合层变化的特征及成因,但没有定量给出控制上混合层变化的各要素的作用,也不能对上混合层变化进行模拟与预测。刘兴泉(2001)对海水化学要素的分析表明:海面强热辐射与海区的温盐结构有密切的关系。王韶霞等(2000)的分析表明,云量是影响包括南海的热带印度洋-西太平洋海域季节内振荡的重要因素。因此,云量通过对短波辐射的调节,对南海混合层的温度和深度都会产生比较大的影响。

为了对南海局地海-气相互作用过程有定量的认识,根据南海季风实验期间每3h一次的气象观测资料和CTD资料,采用一维湍动能(TKE)数值模式模拟了南海北部一个观测点在1998年春季的SST、混合层深度,并在模拟的基础上通过数值实验讨论了在南海夏季风爆发前后各种局地强迫因素对SST、混合层深度变化所造成的影响,为研究南海北部海洋环流奠定基础。

上世纪60年代Kraus等(1967)首先将大气混合层的研究成果应用于海洋,建立了一个简单的一维积分模式,但它对海洋垂直热结构的刻画比较粗糙。Gaspar等(1990)用了普遍适用的特征长尺度方法,改进了湍动能模式,取得了较好的效果。作者在本研究工作中主要采用Gaspar等(1990)的TKE模式。该模式的好处是:相对简单、物理意义明确、能较仔细刻画海洋上混合层的垂直混合特性;他们曾分别用Papa和Lotus站的资料对此模式做了长期(年或年际)和短期(惯性时间尺度到天)的模拟,效果很好。刘秦玉等(1995)曾将此模式嵌入一个热带分层海洋模式,对赤道西太平洋进行了数值模拟,也得到了比较好的结果;TKE模式能够详细刻画海洋、大气相互作用的垂直混合过程,其局限性在于不能用于平流较强或Ekman抽吸较强的情况。

## 1 数值模拟

热带海洋SST的变化主要来自4个方面:一是海表面热通量;二是平流作用;三是风的垂直混合作用;四是上升流作用。根据对南海北、南部两个观测点的资料分析(刘秦玉等,2000),如果只考虑海表面热通量和风的垂直混合作用,混合层温度和深度的随时间变化的总体趋势的成因能被基本确定,可以认为,在南海季风试验(SCSMEX)期间南北两个观测点处,平流与上升流对SST及海洋上混合层特性造成的影响较小,这是作者采用TKE模式来模拟南海北部上混合层的观测依据。

一维情况下,热量、盐度以及动量的守恒方程简化为:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{F_{sol}}{\rho_0 C_p} \frac{\partial I}{\partial z} - \frac{\partial \overline{T'w'}}{\partial z} \\ \frac{\partial S}{\partial t} = - \frac{\partial \overline{S'w'}}{\partial z} \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -f\vec{k} \times \vec{u} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $T$ 、 $S$ 、 $U$  和  $W$  分别是水体的温度、盐度、水平速度和垂直速度;  $\rho_0$  和  $C_p$  分别是海水的参考密度和比热;  $F_{sol}$  是海表吸收的太阳辐射;  $I(z)$  是穿透到  $z$  深度的太阳辐射占  $F_{sol}$  的吸收函数,  $f$  是科氏参数,  $\vec{k}$  是垂直单位向量。海表的湍流通量用下式来表达:

$$- \rho_0 C_p \overline{T'w'}(0) = F_{nsol} = H + LE + F_{ir} \quad (2)$$

$$- \rho_0 \overline{S'w'}(0) = E - P \quad (3)$$

$$- \rho_0 \overline{u'w'}(0) = \tau \quad (4)$$

其中,  $F_{nsol}$  是“非辐射”海面热通量, 即感热( $H$ )、潜热( $LE$ )与海面有效回辐射( $F_{ir}$ )的总和;  $E$  和  $P$  分别是蒸发率和降水率;  $\tau$  是海面风应力。有关该模式的详细信息, 请参阅文献 Gasper 等(1990), Liu 等(1995), 刘秦玉等(1995)。

根据 1998 年南海季风实验(SCSMEX)中科学 1 号船与实验 3 号船观测的气象资料(包括风速、海水表面温度、海表面大气温度、云量、相对湿度等), 利用 Launianen 等(徐天真等, 1993)的方法和程序, 计算了潜热通量、感热通量和风应力, 并将其作为数值模式的强迫场, 对同期观测的 CTD 资料进行数值模拟和数值试验。模式垂直方向上的分辨率为 1m, 时间步长为 300s, 计算的深度为 0—240m。在本文中采用由表层盐度和比表层温度低 0.5℃ 的温度值计算出一个密度, 这个密度所在的深度即混合层底所在处, 称为混合层深度(Tomczak, 1992)。由于没有资料, 因此作者在本文使用的模式中忽略了海面的蒸发、降水和海面有效回辐射。

南海季风实验中, 实验 3 号船位于南海北部(20°N, 116°E)。观测时段分别为 1998 年 5 月 8 日 11:00 时到 5 月 21 日 23 时和 1998 年 6 月 4 日 08:00 时到 6 月 23 日 11:00 时。以上观测资料的时间间隔均为 3h。在数值积分过程中, 将海-气界面强迫场按时间线性内插到每一个时间步长上。

图 1a、c 为南海北部 5 月份、6 月份 SST 随时间变化趋势曲线与相应的模拟曲线。其中可见, 5 月份数值模拟结果能够很好地反映 5 月 16 日以前的 SST 随时间的变化。5 月 16 日以后, 模式能够模拟因短波辐射急剧下降和风应力增大使 SST 降低的现象, 也能模拟 6 月 19 日以后因风应力减小和短波辐射加大使 SST 上升的现象。但 5 月 16 日—6 月 10 日的模拟结果与观测结果, 在量值上有一定的差异(1—2℃), 这是由于该时段风速增大, 平流作用增大, 一维的 TKE 模式忽略了温度的平流作用所造成的结果。作者在本文中计算了模拟曲线与实测曲线的相关系数, 5 月份为 0.88; 6 月份二者的相关系数为 0.68 (信度超过 95% 的显著性检验标准为 0.2)。可见作者在本文中采用的 TKE 模式能较好地模拟春季南海北部观测点的 SST。

图 1b、d 是南海北部 5 月份、6 月份混合层深度随时间变化趋势曲线与相应的模拟曲线。从图中可以看到, 模式不能模拟混合层深度非常剧烈的高频变化。这是由于混合层

深度受到观测点所在处位置内潮的影响很大(刘秦玉等, 2000), 而该模式没有考虑潮汐, 不可能模拟出内潮对混合层深度的影响。但通过对实测值做 8 点滑动平均(1b、d 中的粗实线), 则可发现, 模拟值能很好地反映混合层深度随时间的变化趋势。在 5 月份, 由实测资料计算所得混合层深度随时间变化曲线的滑动平均曲线与模拟曲线比较吻合, 二者差值的平均值约为 2.6m; 在 6 月 4 日到 8 日模拟的混合层深度与观测值差距较大, 这也是由于该模式没有考虑平流作用、Ekman 抽吸及降水效应所引起的误差。

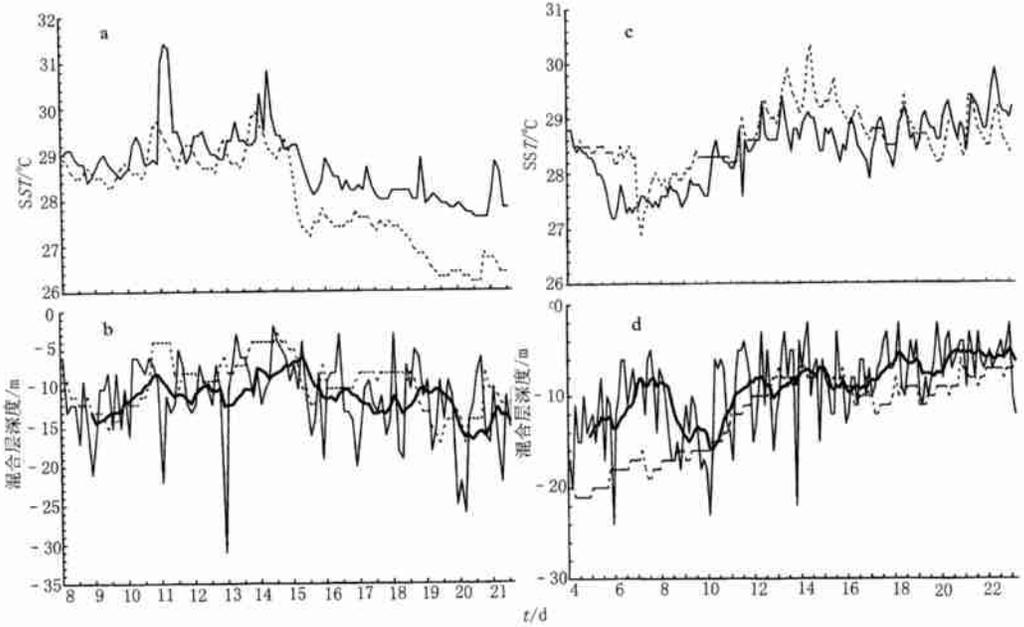


图 1 1998 年南海北部海表面温度 SST (a、c)、混合层深度 (b、d) 实测值与模拟值随时间变化图(实线: 实测值; 虚线: 模拟值; 粗实线: 实测值的 8 点平滑值) (a、b) 为 1998 年 5 月; (c、d) 为 1998 年 6 月 (图 2、3、4 同)

Fig. 1 Measured and calculated time series of SST (a, c) and the mixed layer depth (b, d) in the north of SCS (solid line: observation data; dashed line: simulation data; thick solid line: observation data with 8 point smoothing) during May (a, b) and June (c, d) 1998

综上所述, 尽管内潮引起的上混合层深度的高频变化在南海北部的“试验 3 号”船的观测中是很明显的, 局地海面通量强迫下的 TKE 模式不能模拟内潮引起的上混合层深度的高频变化, 但能够很好地模拟南海南部和北部观测点的海表面温度 SST 和上混合层深度随时间变化的低频变化特征。在此基础上, 利用 TKE 模式做几个数值实验, 以探讨春季南海上混合层的形成机制。

## 2 数值实验

为了估计风、辐射和感热、潜热通量各自在混合层变化中的作用, 作者进行了以下的数值试验, 并将数值试验的结果与数值模拟结果相比较(在比较时将数值模拟结果作为参考值)。

## 2.1 风应力的垂直混合作用

在实验 a 中, 令风应力为零; 在实验 b 中, 令风应力为观测值的一半; 在实验 c 中, 令风应力为观测值的 2 倍(风应力的变化, 会引起潜热的变化, 在本实验中, 潜热仍取实际观测值)。将数值模拟的结果作为数值试验的参考值。

在南海北部观测点, 当撤消风应力的作用后, SST 振幅明显增加, 表现出很强的日振荡, 在一天时间内, 温度的变化可达到  $4^{\circ}\text{C}$ , 如图 2a、c 中的细实线所示。实验 b 和实验 c 结果也表明了风的垂直混合作用会使 SST 变小, 同时抑制了 SST 的日周期振荡。南海北部 5 月 16 日(季风爆发后)到 6 月 11 日 SST 的变化不太受风应力的影响, 风速的加倍对 SST 的影响不大。数值试验表明, 风的垂直混合作用会使 SST 变小, SST 的日振幅主要由海面净热通量控制, 风应力对其日变化振幅有抑制作用。

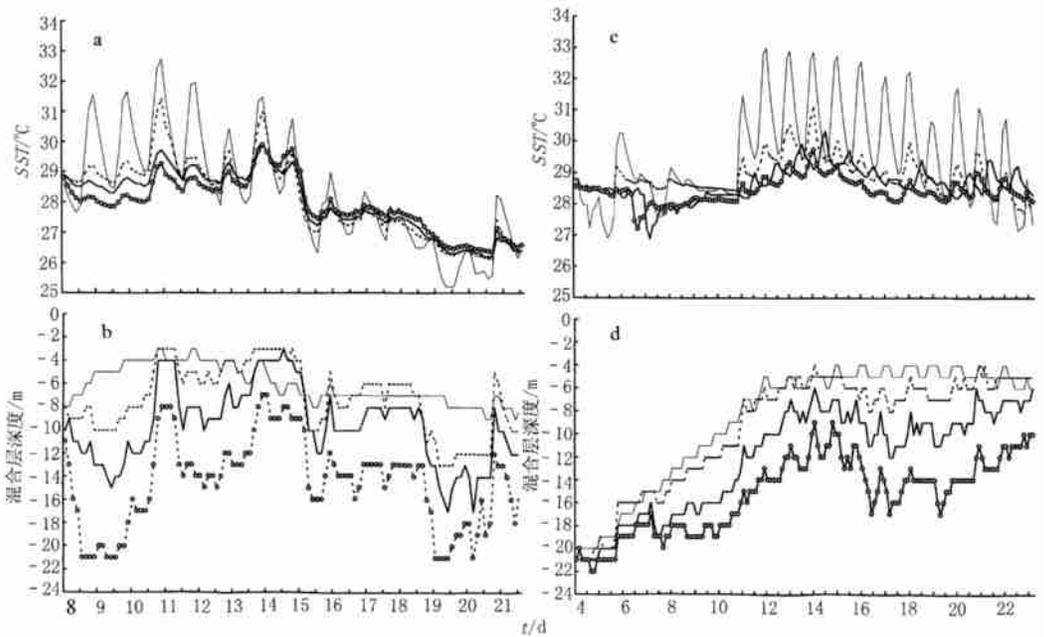


图 2 1998 年南海北部海表面温度 SST (a、c)、混合层深度(b、d)实验参考值与模拟值随时间变化(图中粗实线: 实验参考值; 细实线: 由风应力实验 A 得到的值; 虚线: 由风应力实验 B 得到的值; 带圆的虚线: 由风应力实验 C 得到的值)

Fig. 2 Time series, derived from numerical experiments and simulations, of SST (a、c) and the mixed layer depth (b、d) in the north of SCS. Solid line: simulation data; thin line: data from Experiment A about wind stress; dashed line: data from Experiment B about wind stress; dashed line with dot: data from Experiment C about wind stress

由图 2b、d 中的细实线可见, 当撤消风应力的作用后, 混合层的整体深度大幅度变浅(平均为 10m 左右)。对南海北部 5 月份, 除了在一些个别时间段外, 原混合层深度随时间变化的趋势几乎面目全非。但是对于南海北部 6 月份, 撤消风应力后, 混合层尽管变浅(平均为 5—6m), 但还保持混合层深度随时间变化的趋势和振荡特征。在实验 b 中, 考虑了风应力的作用, 但风应力的量值取为原来的 1/2, 数值模拟中的混合层深度随时间变化趋势立即在数值试验的结果中出现, 但数值试验中混合层深度比数值模拟的深度(参考

值)稍浅。在南海北部,除了几个少许时间段内,实验曲线变化趋势基本反映了模拟曲线变化趋势;在南海南部 6 月份,实验值与参考值的变化趋势非常一致。若把风应力增大到原来的 2 倍,如图 2 中带圆的虚线所示,混合层深度普遍加深。5 月份,与参考值相比,混合层加深不超过 2m,6 月 8 日以后风应力增大到原来的 2 倍,混合层加深约为 3—6m。因此风应力与混合层深度的关系并不是一个简单的线性关系。

总之,通过各种风应力强迫实验,证明在 5 月风应力可使南海北部 SST 减小,抑制 SST 的日变化;风应力使混合层的加深(5—10m)。

## 2.2 短波辐射的作用

实验方案如下:在实验 a 中,令短波辐射为零,在实验 b 中,短波辐射为观测值的一半,在实验 c 中,令短波辐射为观测值的 2 倍。将数值模拟的结果作为数值试验的参考值。

从实验 a 的结果可见,撤消了太阳短波辐射的影响,如图 3a、c 中的细实线所示, SST 与作参考的 SST 相比,无一例外地要小 1—4℃。同时, SST 几乎一直是单调递减的, SST 随时间日变化特征(时增时减)骤然消失。可见太阳辐射对于 SST 的日变化起着决定性的作用,是上混合层温度升高的热源。在实验 b 中,考虑了短波辐射的作用,但是其量值取为原来的 1/2, SST 的变化结果如图 3 中虚线所示。可以清晰地看到,加进短波辐射的作用后,虽然量值仅为原来的 1/2,但 SST 随时间变化特征已经基本上表现出来了。这说明 SST 随时间的低频和高频变化基本依赖于太阳短波辐射的低频或高频变化。在实验 c 中,不仅考虑了短波辐射的作用,而且把其量值取为原来的 2 倍。结果发现, SST 在任何时候,都要大于作为参考值的 SST,两者在同一时间的差值甚至可达到 4℃。而且实验中的 SST 随时间变化的趋势与数值模拟的 SST 随时间变化趋势相同,只是日变化特征更明显。

在本文所研究的时空范围内,混合层深度在没有短波辐射的作用时都要深于对应时刻数值模拟的参考深度(1—10m)(图 3b、d)。而且,在短波辐射较大,数值模拟混合层深度较浅的时候,实验 a 混合层深度值与参考值差别很大(最大值约为 10m)。在讨论风应力对混合层深度的贡献时发现,在没有风有短波辐射的时候,由于上层海洋层结稳定度的增大,混合层变的非常浅;现在又发现,在有风但没有短波辐射的时候,混合层处处存在。可见风应力对混合层的出现起到了决定的作用,并使其深度加深,而短波辐射则使混合层的深度变浅,温度升高。在实验 b 中,考虑了短波辐射的作用,但量值取为原来的 1/2。作者发现,除了南海北部的 6 月 4 日到 6 月 10 日与数值模拟中的一样外,南海北部 5—6 月混合层深度普遍比数值模拟得到的值深。在实验 c 中,把短波辐射的量值取为原来的 2 倍,会造成混合层深度平均变浅 1—3m,但当短波辐射强时,则会出现混合层的大幅度抬升,例如南海北部 6 月 6 日和 6 月 7 日,在实验 c 中混合层会变浅 5—10m。5 月短波辐射的实验值与参考值之差大于 6 月时两者之差,这表明 6 月短波辐射因云量的增加变小,其作用变小。

综上所述,春季南海北部,短波辐射会使 SST 升高 1—4℃,混合层深度变浅 1—10m,当短波辐射大到一定量值时,混合层很浅。

## 2.3 非太阳辐射热通量(感热和潜热通量)的作用

实验方案如下:在实验 a 中,令感热和潜热通量为零,在实验 b 中,感热和潜热通量为

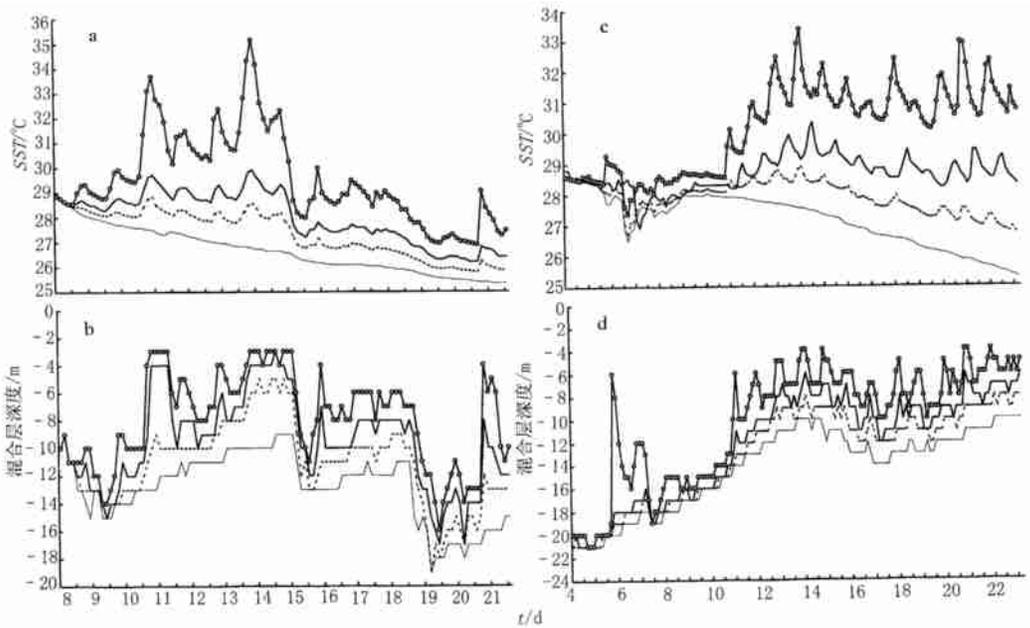


图 3 1998 年南海北部海表面温度 SST (a、c)、混合层深度 (b、d) 实验参考值与模拟值随时间变化 (图中粗实线: 实验参考值; 细实线: 由短波辐射实验 A 得到的值; 虚线: 由短波辐射实验 B 得到的值; 带圆的虚线: 由短波辐射实验 C 得到的值)

Fig. 3 Time series, derived from numerical experiments and simulations, of SST (a、c) and the mixed layer depth (b、d) in the north of SCS. Solid line: simulation data; thin line: data from Experiment A about short wave radiation; dashed line: data from Experiment B about short wave radiation; dashed line with dot: data from Experiment C about short wave radiation

观测值的一半, 在实验 c 中, 令感热和潜热通量为观测值的 2 倍。将数值模拟的结果作为数值试验的参考值。将感热和潜热的共同作用放在一起作为非太阳辐射热通量讨论, 代表春季海洋对大气释放的热量。

同在上面的风应力和短波辐射的实验类似, 忽略感热和潜热通量的结果, 用图 4a、c 中的细实线表示, 该实验值与参考值相比相差不超过  $1^{\circ}\text{C}$ , 而且各个时间处这个差值几乎相同, 即实验中得到的 SST 值随时间变化趋势曲线几乎是原参考 SST 曲线的向上平移; 在实验 b 中, 考虑了非太阳辐射的作用, 大小取为原来的  $1/2$  (失热量为原来的一半)。由此得到的 SST 仍然大于数值模拟的 SST。与实验 a 类似, 南海北部实验 SST 值与参考 SST 的差值很小, 而且各个时间处这个差值几乎相同。在实验 c 中, 非太阳辐射热通量的量值被放大 2 倍, 得到的 SST 要小于数值模拟 SST。

从上述 3 个实验结果可知, 非太阳辐射热通量使海洋失热, 对 SST 的升高起抑制作用。但在春季南海海域, 非太阳辐射与短波辐射和风应力相比较, 是一个对 SST 影响较小的量。

图 4b、d 为作者所研究的二个航次在非太阳辐射热通量的 3 个实验中混合层深度的变化曲线。可以发现, 在撤消非太阳辐射热通量的作用后, 混合层深度变浅大约 1—2m, 但大致保持原来的变化特征。减小非太阳辐射热通量值 (实验 b) 时, 混合层深度略浅于

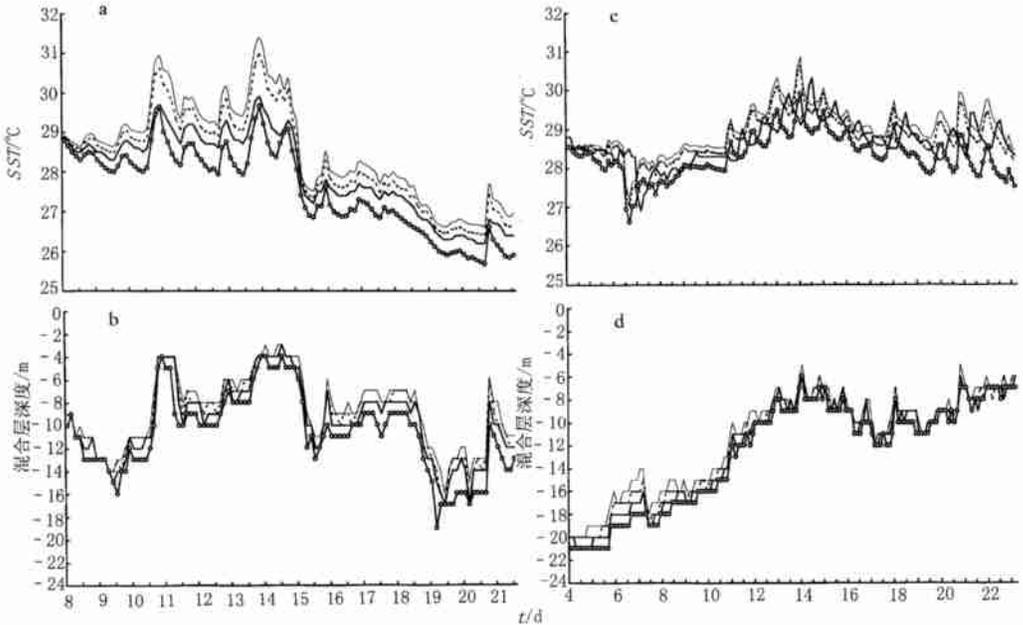


图 4 1998 年南海北部海表面温度  $SST$  (a、c)、混合层深度(b、d)实验参考值与模拟值随时间变化(图中粗实线: 实验参考值; 细实线: 由非太阳辐射热通量实验 A 得到的值; 虚线: 由非太阳辐射热通量实验 B 得到的值; 带圆的虚线: 由非太阳辐射热通量实验 C 得到的值)

Fig. 4 Time series, derived from numerical experiments and simulations, of  $SST$  (a、c) and the mixed layer depth (b、d) in the north of SCS. Solid line: simulation data; thin line: data from Experiment A about non-sun radiation; dashed line: data from Experiment B about non-sun radiation; dashed line with dot: data from Experiment C about non-sun radiation

参考值; 增大非太阳辐射值(实验 c) 时, 混合层深度略深于参考值。但可以明显地看到, 非太阳辐射对于混合层的影响远不及风应力及太阳辐射对混合层的影响。因此, 春季南海北部非太阳辐射热通量使  $SST$  减小不到  $1^{\circ}\text{C}$ , 混合层的深度加深  $1\text{--}2\text{m}$ 。该量对  $SST$  和混合层深度的影响与风应力和短波辐射的作用相比要小得多。

### 3 结论

在资料分析的基础上, 采用一维湍动能模式——TKE 模式对南海南北部观测点的  $SST$  及混合层深度随时间变化特征进行了模拟。模拟结果表明: 尽管局地海面通量强迫下的 TKE 模式不能模拟由内潮引起的上混合层深度的高频变化, 但能够很好地模拟由局地海气相互作用引起的南海北部观测点海表面温度  $SST$  和上混合层深度随时间变化的低频变化特征。

以数值模拟为参考, 进行了一系列数值实验。结果表明: 在南海北部观测点, 春季风的局地垂直混合抑制了  $SST$  的日周期振荡。太阳短波辐射是  $SST$  维持的主要热源, 它对  $SST$  随时间变化趋势起着决定性的作用, 短波辐射会使  $SST$  升高  $1\text{--}4^{\circ}\text{C}$ 。  $SST$  随时间的低频和高频变化基本依赖于太阳短波辐射的低频或高频变化。潜热和感热通量使海洋失热, 对  $SST$  的升高起抑制作用。该量对  $SST$  和混合层深度的影响与风应力和短波辐射的

作用相比要小得多。

在南海北部观测点, 风应力在混合层深度随时间变化中起着重要的作用, 并能使混合层深度加深 5—10m。而短波辐射则使混合层深度变浅 1—10m, 当短波辐射大到一定量值时, 混合层很浅。潜热和感热通量对混合层的作用会使混合层的深度加深 1—2m, 但在南海春季, 该量对混合层深度的影响与风应力和短波辐射的作用相比要小得多。由于短波辐射在夏季风爆发后变小, 南海 6 月份混合层深度的变化趋势和振荡特征主要受风应力控制, 而 5 月份南海北部混合层深度的变化主要受风应力和短波辐射共同控制。

在南海北部观测点春季, 混合层深度由浅变深的过程主要由风应力控制, 由深到浅的过程主要由辐射加热控制。

在研究中由于资料的原因没有考虑蒸发和降水, 没有考虑海面有效回辐射, TKE 模式没有考虑平流作用等。这些因素的影响虽不是非常重要, 但没有考虑这些因素, 势必会影响全面对南海上混合层形成机制的理解。另外, 南海南部 5 月份上层海洋结构比较复杂, 说明除本文讨论的主要影响因素之外, 在特定的时间段内, 其他影响因素的作用需要深入的进行考虑, 有待于进一步研究。

## 参 考 文 献

- 王韶霞, 刘秦玉, 徐启春, 2000. 热带东印度洋-西太平洋 OLR 季节内振荡空间分布特征. 海洋与湖沼, 31(1): 78—83
- 邱 章等, 1996. 1994 年 9 月南沙群岛调查海区的跃层特征. 热带海洋, 15(2): 61—66
- 刘秦玉, 贾旭晶, 孙即霖等, 2000. 1998 年夏季风爆发前后南海上混合层的特征及成因. 气候与环境研究, 5(4): 469—481
- 刘秦玉, 王 启, 1995. “暖池”表层对大气局地强迫的响应特征. 海洋与湖沼, 26(6): 658—664
- 刘兴泉, 2001. 东海 PN 断面夏季温盐及化学要素的分布特征. 海洋与湖沼, 32(2): 204—212
- 徐锡祯, 邱 章, 龙小敏, 1993. 南海温跃层基本特征及一维预报模式. 海洋与湖沼, 24(5): 494—502
- 徐天真, 陈伯海, 1993. 西太平洋暖池区海-气通量计算分析. 青岛海洋大学学报, 增刊, 23: 99—107
- Liu Qinyu, Jilin Sun, 1995. The Mechanism Of Mixed Layer Intraseasonal Variations in the “Warm Pool” Area. Proceedings of the International Scientific Conference on the Tropical Ocean Global Atmosphere TOGA Programme. WCRP-91-WMO/TD, 717: 761—765
- Liu Qinyu, Yinlai Jia, Penhui Liu, *et al.*, 2001. Seasonal and intraseasonal thermocline variability in the central South China Sea. Geophysical Research Letters, 28(23): 4467—4470
- Gaspar P, Gregoris Y, Lefevre J M, 1990. A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing tests at station papa and long-term upper ocean study site. J G R, 95(c9): 16179—16193

## NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTS OF THE UPPER MIXED LAYER IN THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA IN SPRING

LIU Qin-Yu, SUN Ji-Lin, JIA Xi-Jing

(*Physical Oceanography Lab. & Ocean-Atmosphere Interaction Lab.*,

*Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003*)

**Abstract** In this paper, a 3-D Turbulence Kinetic Energy (TKE) model was used to simulate and experiment on the SST and upper mixed layer in the northern South China Sea (SCS) in spring, and to discuss the relevant mechanisms. The results show that the TKE model can simulate the main features of the time variables of the SST and mixed layer depth. In May and June, 1998, the daily oscillation of the SST was mainly determined by daily variation of the solar short-wave radiation, which maintained the SST mainly and caused the SST increase by 1—4 °C; the mixing effect of the wind restrained the daily oscillation of the SST. Compared with solar short-wave radiation and wind stress, the latent heat and sensible heat flux are a minor factor in controlling the variable of the SST in spring. In May, both wind stress and solar short-wave radiation control the depth of the upper mixed layer, and the effect of wind stress caused the mixed layer to grow to 5—10m, and the short-wave radiation could reduce the mixed layer depth by 5—10m. However, in June, solar short-wave radiation was smaller after summer monsoon onset, reducing the mixed layer depth only by 1—2m, and the latent heat and sensible heat flux further enhanced the mixed layer depth by more than 1—2m, with the depth of mixed layer being controlled mainly by wind stress.

**Key words** Northern South China Sea, Mixed layer, Turbulence Kinetic Energy model, Numerical simulation